



空気中における氷円柱の融解に関する実験的研究

著者	野澤 勝廣
号	937
発行年	1987
URL	http://hdl.handle.net/10097/11886

氏 名 野 澤 勝 廣

授 与 学 位 工 学 博 士

学 位 授 与 年 月 日 昭 和 62 年 12 月 9 日

学 位 授 与 の 根 拠 法 規 学 位 規 則 第 5 条 第 2 項

最 終 学 歴 昭 和 35 年 3 月

室蘭工業大学工学部機械工学科卒業

学 位 論 文 題 目 空 気 中 に お け る 氷 円 柱 の 融 解 に 関 す る 実 験 的 研 究

論 文 審 査 委 員 東 北 大 学 教 授 武 山 斌 郎 東 北 大 学 教 授 太 田 照 和

東 北 大 学 教 授 大 谷 茂 盛 東 北 大 学 教 授 鈴 木 睦

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 言

氷は融解点が低く融解潜熱も比較的大きくかつ自然界に安全な状態で豊富に存在する冷熱資源であることに起因して、その融解は古くから有効な冷却法として一般工業にも広く利用されてきた。

湿り空気中における氷の融解は冷凍冷蔵および湿り空気の冷却除湿など空調工業の面において、しばしば見られる現象である。また最近原子炉の安全運転のための急速停止時の多量の蒸気のアイスコンデンサ用に利用されている。なお熱効率向上を目的とした熱機関の低熱源としての利用も考えられている。氷の融解現象は相変化を伴い融解面が移動変形する物質移動を伴う熱移動現象であり、非常に複雑な挙動を示す。このような複雑な融解現象を定量的に把握しようとするとき、それに影響をおよぼす諸因子が多過ぎることが原因して、多くの場合非常に困難を伴う。したがって工業界において融解伝熱の解明は強く望まれているにもかかわらず、現状では非常に遅れている分野である。また既往の研究は理論的なものがほとんどで、実験的な研究は2～3例にしか過ぎない。特に氷の融解を利用する装置設計上重要な氷の形状変化の特性、融解伝熱係数などの確証のある資料が皆無に近い状態である。理論的解析においては仮定条件が、理想的単純な場合についての取り扱いであり、現実の問題とは離れすぎている感がある。空気中における氷の融解現象は熱および物質の同時移動現象であり、さらに氷の形状変化の特性をも含めて解決されるべき問題である。この難解な現象の定量的な解明のために精度ある実験の基に多くの資料の蓄積が要望されている。

本論文の目的は、空気中における氷の融解現象を氷-水-空気系の3相系として、相変化を含む熱と物質の同時移動の融解現象としてとらえ、この現象を応用する工業装置の設計ならびに操作に必要な基礎的データを得ることである。そこで水平および垂直氷円柱を用い、強制対流および自然対流など種々の条件のもとに、その融解実験を行った。

本論文は7章から構成されている。

第1章は緒言であり、本研究を始めた動機と目的について述べた。また主として空気中における氷の融解に関する既往の研究を概説し、本研究の位置付けを行い概要を述べた。

第2章 高レイノルズ数領域における水平氷円柱の融解

水を冷却材として工業装置に用いる場合、例えば冷媒配管上の氷の融解などでは、円柱を対象とする場合が多い。

湿り空気の噴射ノズルを持つ実験装置および横型風洞実験装置を試作し、十字流れの中に置かれた水平氷円柱の融解の実験を行った。写真測定などから種々の特異な現象が観察され、融解時における水平氷円柱の形状は空気速度によって4種に大別された。また融解して流下する水膜が風速の変化にしたがって、現象に複雑な影響をおよぼすことが分かった。融解時における氷円柱は同心円には変形せず偏心するが、その度合の少ない融解の初期における局所熱伝達係数を求めた。また、湿度0.005から0.02 kg H₂O/kg dry airまでレイノルズ数1,500から120,000までの領域における平均のヌッセルト数とレイノルズ数の関係を表す実験式を求めた。さらに氷円柱の前方および後方激み点についても湿度の影響を考慮した実験式を求めた。

第3章 低レイノルズ数領域における水平氷円柱の融解

レイノルズ数1,700以下の領域は、第2章に述べたごとく風速の変化により4種に大別されるうちの低風速の2種の場合に相当する。そして写真観察などの結果から、この領域は自然対流と強制対流が共存し、レイノルズ数の変化によってそれぞれの共存支配力の度合の大きさが顕著に変化することが分かった。また融解時の氷円柱の局所半径の写真測定から局所融解熱伝達係数を求め、それに基づいて湿度0.005から0.023 kg H₂O/kg dry airまでレイノルズ数100から1,700までの領域における平均ヌッセルト数とレイノルズ数の実験値の関係におよぼす湿度の影響を考慮した実験式を求めた。これと第2章に述べた伝熱特性を比較すると、本実験式の平均ヌッセルト数におよぼすレイノルズ数の影響ははるかに小さいことが分かった。さらに第2章の実験式の適用範囲はレイノルズ数1,000から120,000まで広げられること、および高・低レイノルズ数のいずれか一方の領域の湿度の影響を考慮した平均ヌッセルト数対レイノルズ数の関係が分かると他方の湿度の影響を考慮した平均ヌッセルト数対レイノルズ数の関係も簡単に求められることが分かった。最終的には第2章および第3章の実験式などから、レイノルズ数100から120,000と相当広い範囲にわたる平均ヌッセルト数の特性が明らかにされた。

第4章 垂直円管内強制対流下における垂直氷円柱の融解

垂直ガラス管内に上向きに熱風を流し、その中に垂直氷円柱を吊り下げて融解実験を行った。写真観察によると、この垂直氷円柱の融解時における下端部の形状はガラス管と氷円柱初期直径の断面積比と熱風の流速および温度の影響を受けて、「つの」および「くびれ」状の2種に分けられて変形し、融解が進行するとその融解形状はいずれの場合も最終的には「つの」状に漸近することなど顕著な変化が見られた。

融解初期における垂直氷円柱軸方向の局所についての融解半径の経時変化を写真測定した結果、軸方向局所のそれぞれの位置については直線性があった。そこで二重管としてガラス管と氷円柱初期直径の相当直径を代表寸法にして、ヌッセルト数とレイノルズ数の実験値を円管内助走区間の例にならって整理しその関係を表す実験式を求めた。また垂直氷円柱の助走区間の伝熱特性として、局所と「くびれ」状後方のヌッセルト数比 Nu_x / Nu_∞ 、長さとか相当直径比 x / De の間の関係などを調べた。

第5章 自然対流輻射複合伝熱による垂直氷円柱の融解

密封円筒型加熱炉を試作し、その中に垂直氷円柱を吊り下げて融解実験を行った。装置は特に軸方向の炉内温度分布を均一にするために縦方向に3段階に加熱線を分割して微調整し、同時に炉の下部から垂直氷円柱を挿入し実験初期の外乱は極力除くように工夫した。融解時における垂直氷円柱の形状は、第4章に示された強制対流の下における融解時の形状とは異なり、軸方向の変形は無く半径方向に同心円状に融解変化することを、抜き取り写真測定により確かめた。

垂直氷円柱の融解時重量の経時変化から求めた融解時の氷円柱の半径と経過時間の関係の実験値の特性には、無次元半径比の値が0.2まで直線性があった。また半径方向の融解速度は炉内温度80℃を界に急変する顕著な特性が見られ、融解速度を求める概算式を示した。次に、融解半径と経過時間の関係式に円筒炉の形態係数を考慮した修正式を求め、実験値と良く一致することが確かめた。さらに、複合融解熱伝達係数と氷円柱の間の関係の実験値を整理し、それに基づいて複合融解熱伝達のヌッセルト数とグラスホフ数の関係の実験式を求め、この値から理論的相当輻射伝熱のヌッセルト数を差し引くことにより、グラスホフ数 10^7 から 10^9 までの自然対流融解熱伝達のヌッセルト数の実験式を求めた。これはSunderの求めた単純伝熱の値より50%程大きい値を示していた。

第6章 垂直氷円柱の融解における水膜厚さと融解熱伝達係数

融解表面温度は垂直方向の距離によって変化すると考えられるが、水膜厚さは非常に薄いことおよび氷の融解点0℃にごく近い温度であることに起因して、現在の測定技術では、正確に測るのは困難である。そこで氷の融解速度を実測することから平均温度を求め、これを平均の水膜表面温度の実験値とした。

Nusselt および Brauer によって研究された水蒸気の膜状凝縮の理論を応用し、空気による垂直氷面の融解水膜厚さおよび融解熱伝達係数を求める近似式を、先に述べた水膜表面温度 \bar{t}_{sf} によって表現出来ることを実験的に検討した。厳密解を求めることが困難と感じられる今日上記のような

近似式により，融解速度の比較的正確な測定値によって求められる \bar{t}_{sf} だけから比較的精度よく融解水膜厚さおよび融解熱伝達の平均のヌッセルト数が簡単に求められたことは，近似式の厳密性には若干の問題が残るものの，実際の装置設計および操作に資するデータとしては実験的裏付けがあり有益である。

第 7 章は総括である。

審 査 結 果 の 要 旨

湿り空気中における氷の融解現象は、空気の冷却除湿など空調工業においてしばしば見られる現象である。また、アイスコンデンサや熱機関の効率向上のための低熱源などへの利用も検討されている。しかしこの現象は、物質移動と相変化を伴い、融解面が時間とともに移動変形する複雑な熱移動現象であるため、その研究は非常に遅れており、工業装置の設計に必要な基礎的データの蓄積・整理と理論的解析が望まれている。本論文はこの様な背景のもとに、様々な条件下における氷の融解現象を観察・測定した結果をまとめ、理論的検討を加えたもので全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では高Re数領域における水平氷円柱の融解について述べている。横型風洞を用い、直流れ場における氷の断面形状の変化を写真観察した結果、融解して流下する水膜と気流の相互作用によりその形状は複雑に変形し、およそ4種類に分類できることがわかった。また、初期の融解速度の実測から、湿度の影響をも考慮にいった局所Nu数とRe数間の実験式を求めている。

第3章では低Re数領域における水平氷円柱の融解について述べている。Re数1,700以下で自然対流が共存する場合のNu数を測定し湿度の影響も考慮にいった実験式を提出している。また、前章の結果をも合わせて考察し、高・低Re数領域のいずれか一方における平均Nu数から他方における値を推算する方法を提案した。これは、湿度の効果をも考慮している点で新たな知見である。

第4章では垂直円管内強制対流下における垂直氷円柱の融解について述べている。垂直ガラス管内に熱風を流し、その中に吊り下げた氷円柱の形状変化を測定した。その結果、系の状況に応じて、氷の形は「つの」または「くびれ」状の2種類に分かれて変形することを見だし、その原因が氷柱先端近傍における気流の乱れである事を突き止め、その境界を定量的に推算する方法を求めた。これは重要な知見である。

第5章では自然対流とふく射の複合伝熱場における垂直氷円柱の融解について述べている。垂直円筒型加熱炉内に垂直に吊り下げた氷円柱の融解速度を測定し、自然対流伝熱とふく射伝熱のそれぞれについて実験式を求めた。とくに、融解による形状変化を考慮して炉の形状係数の修正式を求めている。

第6章では前章迄の研究で特に重要な因子となる水膜厚さと熱伝達係数の関係について理論的に考察し、水膜表面温度を用いた半理論式を提案している。これは、重要な成果である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、氷の融解現象を利用する工業装置の設計を念頭において、基礎的データの蓄積と整理をはかり、合わせて理論的解析を試みた論文であり、伝熱工学及び空調工業に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。